

Schritte in die Wasserstoffenergiewirtschaft – Rückblick und Ausschau

Meine 101. Kolumne im „Newsletter Wasserstoff, Brennstoffzelle + Elektromobilität“ gibt Anlass zu Rückblick und Ausschau: Welche Schritte liegen hinter uns, welche sind noch zu gehen, bevor die komplette Wasserstoffenergiewirtschaft im Markt etabliert sein wird und damit die konstitutionelle Rolle des Wasserstoffs und seiner Technologien in der industriellen Volkswirtschaft unseres Landes Gemeingut wurde. Wie elektrischer Strom, die andere Sekundärenergie, die – wie selbstverständlich – Markt und Nutzung in Industrie, Transport und Verkehr sowie Handel und Privatsphäre durchdrungen hat und nicht mehr wegzudenken ist – auch nicht weggedacht werden darf.

Energie und Langmut

Eines vorab: Energie ist nichts für Ungeduldige! Neue Energien und ihre Technologien haben immer viele Jahrzehnte bis halbe Jahrhunderte, ja Jahrhunderte gebraucht, um in Politik, Wirtschaft und Privatem „anzukommen“, unmissverständlich Einsicht zu gewinnen und im Konzert des Energiemix „mitzuspielen“. Immer wieder in den letzten 250 Jahren sind neue Energien im Mix aufgenommen worden: Zu den erneuerbaren Energien der ersten solaren Zivilisation kam Kohle hinzu, später Mineralöl und Erdgas, noch später die Kernspaltung. Jetzt stehen die Erneuerbaren der zweiten solaren Zivilisation an. Speicherbar und transportierbar gemacht durch den Sekundärenergieträger Wasserstoff, immer begleitet durch – so ist zu fordern – radikale Effizienzsteigerungen in allen Gliedern der Energiewandlungskette. Denn die bisher erreichte Nutzungseffizienz selbst der deutschen Energiewandlungskette ist mit gut 30 Prozent nun nicht gerade beeindruckend. Nicht zu sprechen von der Exergieeffizienz, die mit bescheidenen 15 Prozent technische Arbeitsfähigkeit bereitstellt: Höhere Effizienz der Energiewandlung kommt heimischer Energie gleich!

Effizienz entlastet die Volkswirtschaft vom Importdruck, die nicht importierten Mengen an Energierohstoffen reduzieren Umweltschadstoffe und Klimagase. Keine der Additionen zum Mix hat die jeweils etablierten Energien gänzlich verdrängt, allenfalls in ihren Anteil gemindert, Heterogenität wuchs. Das wird nicht anders sein, wenn jetzt erneuerbare Energien und Wasserstoff hinzustoßen. Die Erfahrung lehrt: Regelmäßig sind die Ingenieure schon da, wenn Politik und Öffentlichkeit – gelegentlich zögerlich und mühsam – folgen. Energie braucht Langmut, zu oft verkannt, immer wieder bestätigt. Wasserstoff geht zurück auf frühe Veröffentlichungen von Henri Cavendish, der 1766 über „brennbare Luft“ berichtete, und Antoine Lavoisier, der sie 1787 „Hydrogenium“ nannte – Wasserstoff. Die moderne Wasserstofftechnologieentwicklung begann erst nach dem 2. Weltkrieg mit dem Wasserstoffschub (im doppelten Wortsinn) in der Raumfahrt. Dazwischen liegen 1800 die Elektrolysearbeiten von William Nicholson und 1838 die Arbeiten J. Dewars zur Wasserstoff-Verflüssigung.

Tendenzen

Es gibt Tendenzen, welche die Aufnahme des Wasserstoffs in den Mix geradezu zwangsläufig machen: Die Reihe des komplettierten Mix zeigt eine deutliche Neigung des atomaren Verhältnisses von Wasserstoff zu Kohlenstoff H/C zu klimaökologisch willkommener Entkarbonisierung: H/C für Kohle zu Öl zu Erdgas zu Wasserstoff verhalten sich wie $< 1 : 2 : 4 : \text{unendlich}$. Klima-ökologisch bedenklich ist, dass in neuester Zeit durch die rasante Industrialisierung der Schwellenländer und deren dominierende Kohlenutzung in mäßig effizienten Kraftwerken (weit unter den gut 50 Prozent modernster Entwicklungen) der relative Kohlenstoffanteil wieder ansteigt.

Eine weitere Tendenz: Die Versorgung von Energiewirtschaften industrieller Länder hohen Importanteils (Deutschland ca. 75 Prozent!) wird bei zunehmender Nutzung erneuerbarer Energien nur gelingen, wenn hohe Anteile erneuerbaren Wasserstoffs für den Import sorgen. Die natürlichen Ressourcen der Erneuerbaren – etwa Sonnenenergie im äquatorialen Erdgürtel oder Windenergie in Patagonien – sind bisher nicht aktiviert, die hohen Nachfragen der Industrieländer der nördlichen Hemisphäre zu decken. Es ist nicht illusionär anzunehmen, dass über einen längeren Übergangszeitraum das funktionsfähige System globaler Versorgung mit fossiler Energie für erneuerbaren

Wasserstoff mustergebend wirkt und perpetuiert wird. Zum Beispiel in den kontinentalen Erdgaspipelinesnetzen, die vorübergehend ohne wesentliche technische Änderungen mit 15 Prozent Wasserstoff huckepack betrieben werden würden oder den Flüssigerdgas-Tankschiffen, die indes mit der weitaus tieferen LH₂-Temperatur von minus 253 Grad Celsius betrieben werden müssten.

Eine dritte Tendenz: Es ergab sich so, dass im globalen Energiehandelssystem die Beseitigung von Umweltschadstoffen und Treibhausgasen nahezu ausschließlich dem Energienachfrager obliegt, während der Energielieferant davon frei ist und sich auf die Gewinnung und Lieferung der Energierohstoffe beschränken kann. In der Folge entstand eine erdumspannende Zirkulation von Schadstoffen und Klimagasen. Das wird der bevorstehende Wasserstofftransport ändern. Der Transport von erneuerbarem Wasserstoff sowieso, aber auch Wasserstoff aus fossiler Energie hinterlässt die Schadstoffe und potentiellen Klimagase aus der Wasserstoffgewinnung an den Kohlegruben oder auf den Gasfeldern. Global transportiert (und gespeichert) wird dann nur mehr umwelt- und Klima-ökologisch sauberer Wasserstoff – die Zirkulation von Schadstoffen und Klimagasen entfällt.

Schließlich eine letzte Tendenz, die selbst dem Ingenieur zu verstehen nicht immer leicht fällt: Wasserstoff exerziert Energie. Was in den höheren Semestern Thermodynamik gebracht wird, soll hier nicht wiederholt werden. Konzentrieren wir uns auf zwei plausible Beispiele aus unser aller exergetischem Tagesgeschäft: Unser Haus wird mithilfe von Erdgas oder Leichtöl versorgtem Brenner und Kessel beheizt. Die energetische Umsetzung des Energieinhalts des Brennstoffs ist exzellent. Fast 100 Prozent werden in Wärme umgewandelt, wenn auch bei Flammentemperaturen von ca. 1000 Grad Celsius, für die kein Nutzer bereitsteht. Denn die Raumradiatoren verlangen Vorlauftemperaturen von nur 60 bis 70 Grad Celsius. Folglich sind die exergetischen Wirkungsgrade in der Bereitstellung technischer Arbeitsfähigkeit miserabel. Ersetzen wir die Kessel/Brennerkombination durch eine Wasserstoff-versorgte Niedertemperaturbrennstoffzelle, die in erster Linie Strom mit einem exergetischen Wirkungsgrad von 35 bis 40 Prozent erzeugt (Strom ist reine Exergie, die in alle denkbaren anderen Energiearten umgewandelt werden kann), so genügt die Restwärme mit just der Radiator-Vorlauftemperatur um 70 Grad Celsius nach wie vor, den Wärmebedarf des Hauses über den größten Teil des Jahres zu decken. Nur für die extrem kalten Januar/Februarabende ist ein kleiner Hilfskessel nötig.

Das zweite Beispiel zeigt auf die Fülle der zu reduzierenden, unvermeidlichen Irreversibilitäten in Kohlekraftwerken. Sie verbrennen die Kohle, anstatt sie zu vergasen, um so H₂ und CO zu gewinnen, das CO zu CO₂ zu shiften und dadurch mehr H₂ zu gewinnen. Dieses wird in effizienten Triple-Kombianlagen aus Hochtemperaturbrennstoffzelle, Gasturbine, Dampfturbine verstromt oder dem Wasserstoffmarkt zur Verfügung gestellt, etwa in Transport und Verkehr. Die gigantischen irreversiblen Wärmemengen derzeitiger Kohleverstromung (die Hälfte des Kohle-Energieinhalts selbst bei exergetisch höchsteffizienten Kraftwerken von 50 Prozent Wirkungsgrad!) werden reduziert, mehr Energie wird zu Exergie und nicht zu Anergie (Energie = Exergie + Anergie). Und das auf doppelte Weise: der exergetische Wirkungsgrad der Kohleverstromung steigt und die Wasserstoff versorgte Brennstoffzelle am Ende der Energiewandlungskette an Bord der Autos oder in den Kellern unserer Häuser trägt noch einmal zum Effizienzgewinn bei. Beide Beispiele zeigen, was unter Exergetisierung durch Wasserstoff zu verstehen ist.

Wasserstofftechnologien

Nun zu den Technologien, gehen wir sie für jedes Kettenglied der Energiewandlungskette durch.

Produktion

Die Erdgasreformierung zu Wasserstoff ist industriell verfügbar. Kaum ein Industrieland, das nicht die eine oder andere Reformer-Großanlage betreibt und den gewonnenen Wasserstoff über den Technische Gase-Markt vertreibt, gasförmig oder verflüssigt. Die Raffinerien nutzen Wasserstoff in der üblichen Tagespraxis zur Entschwefelung von Diesel oder zur Reformulierung von Benzin-Destillaten. Die Kohlewirtschaft kennt die Kohlevergasung seit den 1930er/40er Jahren, nutzt sie heute aber kaum. Hier herrscht Entwicklungsbedarf zu höchsteffizienter Wasserstoffbereitstellung aus Kohle. Die Elektrolyse ist industriell üblich, ihr kommt zur Produktion erneuerbaren Wasserstoffs

künftig besondere Bedeutung zu. Kritisch zu beurteilen ist die Wiederverstromung von Elektrolysewasserstoff, selbst wenn die effiziente Brennstoffzelle eingesetzt wird und den mäßigen Wirkungsgrad der Elektrolyse zu kompensieren hilft. Immer ist die Energiewandlungskette die bevorzugte, welche die kleinere Zahl an – verlustbehafteten – Kettengliedern hat!

Speicherung und Transport

Während die Speicherung von Strom schwierig oder großtechnisch bei weitgehender Ausnutzung der Topologien für Pumpspeicherkraftwerke (wie in Deutschland) unmöglich geworden ist, ist die Speicherung von Wasserstoff verhältnismäßig leicht. Alle Wasserstoff Pipelinenetze, alle unterirdischen Kavernen unter permeationsdichten Deckschichten, alle Millionen (künftig zig-Millionen) automobilen Wasserstofftanks, alle Tanks an den Wasserstofftankstellen, alle etwaigen Tanks zur Versorgung der hauseigenen Brennstoffzellen sind virtuelle Speicher im weiteren Sinne. Die bisherigen Erfahrungen wurden mit Drücken von 30 bar in Netzen gemacht, mit 100 bar in Kavernen, 700 bar in Autotanks. Sensorik und hohe, senkrecht nach oben gerichtete Wasserstoffdiffusivität sorgen für Sicherheit.

Der Transport von gasförmigem oder verflüssigtem Wasserstoff in Netzen, auf Trailern ist Stand der Technik. Noch jedoch ist kein LH2-Tankschiff auf den Weltmeeren unterwegs; hier ist Entwicklungsarbeit erforderlich, welche die Be- und Enttankung in Häfen und die Wasserstoffversorgung des Schiffsantriebs einschließt.

Wasserstoffnutzung

Die erst in den letzten Jahrzehnten einsetzende moderne Entwicklung zur Wasserstoffnutzung fand ihren deutlichen Schwerpunkt in der Brennstoffzelle und hier besonders in ihrer Anwendung als Automobilantrieb und als Energiezentrale in Gebäuden. Die Entwicklungen gehen auf Ch. Fr. Schönbein und W. Grove zurück. Der eine berichtete 1839 über den Brennstoffzelleneffekt, der andere 1845 über die erste Brennstoffzelleninvestition. Energiewissenschaftlich ist damit etwas sehr Bedeutsames geschehen: Die bisher dominierende Thermodynamik von Wärmesystemen mit dem Ergebnis der Produktion gigantischer anenergetischer Wärmemengen, die an die Umgebung abgegeben und in den Weltraum abgestrahlt werden (Deutschlands nationaler Energienutzungsgrad ist auch nach 250 Jahren Energiegeschichte nur wenig größer als 30 Prozent!), wird ergänzt durch die erfreulich effiziente elektrochemische Energiewandlung. Diese muss den verlustreichen Zwischenschritt zu Wärme nicht gehen, um zur Antriebsenergie im Auto zu gelangen oder zu Strom und Nutzwärme in Industrie und Haus. Hier zeigt sich der eingangs erwähnte konstitutionelle Beitrag des Wasserstoffs zum anthropogenen Energiegebäude, der in der bisherigen Energiegeschichte nahezu ganz fehlte.

In Konsequenz zeigt das Entkarbonisierungsdreieck (siehe Kolumne 96 im Newsletter vom 14. Februar 2012), was energiewissenschaftlich und klimaökologisch bevorsteht. Mit (erneuerbarem) Strom, Wasserstoff und Methan versammeln sich kohlenstofflose und kohlenstoffarme Energieträger wechselseitiger Abhängigkeit bei kompletter oder relativer umwelt- und klimaökologischer Sauberkeit. Strom und Wasserstoff sind über die Elektrolyse und die Brennstoffzelle ineinander umwandelbar. Wasserstoff wird aus Methan reformiert und Methan wird durch Wasserstoff und Kohlendioxid aus der Luft gebildet (Prozess nach Sabatier). Schließlich dient Methan (Erdgas) als Brennstoff in der Stromerzeugung und wird vice versa mithilfe von Strom, Kohlendioxid und Wasserdampf bei Hochtemperatur erzeugt.

Unterschiedliche Brennstoffzellentypen überdecken den Temperaturbereich von < 100 bis < 1000 Grad Celsius. Bei unteren Temperaturen dominiert Wasserstoff als Brennstoff (vorherige Reformierung von Kohlenwasserstoffen erübrigt sich). Mit zunehmender Temperatur darf der Kohlenstoffanteil zunehmen.

Fazit

Noch sind drei deutlich erkennbare Hürden zu nehmen: Selbstverständlich gibt eine Demonstrationsphase für Wasserstoffautos noch keine Auskunft über die letztlich erreichten Kosten, und zwar Kosten des Autos und Kosten des Wasserstoffs. Erstere werden sich einstellen, wenn die massenfertigungsgerechten Stückzahlen erreicht sein werden. Sie dürften sich wohl nicht

wesentlich unterscheiden von denen der dann marktgerechten Benzin- oder Dieselfahrzeuge. Für den Wasserstoffpreis gibt es einen Lichtschimmer. Mit gelegentlichen 4 US-\$/gal Benzin an amerikanischen Tankstellen nähert sich der Benzinpreis dem vom US-Department of Energy vorgegebenen Wasserstoffzielpreis von 6 US-\$/kg Wasserstoff (energetisch: 1 gal Benzin entspricht 1 kg Wasserstoff). Ganz zu schweigen von europäischen 1,70 Euro/Liter entspricht 8,36 US-\$/kg Wasserstoff (Euro/\$ = 1,3, Liter/gal = 3,785). Europa also hat nach der derzeitigen Preisstruktur die Chance, früher wettbewerbsfähigen Wasserstoff anzubieten. Förderlich ist zudem, dass der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs um etwa den Faktor zwei höher liegt als derjenige der Verbrennungsmotoren. Selbst doppelter Wasserstoffpreis würde am Preis der Leistung des Automobils nichts ändern.

Eine zweite Hürde: Noch ist nicht gesichert, dass die Dauerhaltbarkeit der Brennstoffzellenstacks die Lebensdauer des Fahrzeugs erreicht. Nach wie vor ist damit zu rechnen, dass im Laufe der Fahrzeuglebensdauer Stacks ausgetauscht werden müssen.

Schließlich die dritte Hürde: Eine solide, überzeugende und verlässliche Unterrichtung muss die Einführung der Wasserstoffenergiewirtschaft begleiten, kontinuierlich über einen langen Zeitraum. Die Bevölkerung muss "mitgenommen" werden, wenn der Erfolg sich einstellen soll. Es ist ein Trugschluss zu glauben, dass übliche Medien-PR-Kampagnen genügen.

Alles zusammengenommen: Die Wasserstoffenergiewirtschaft ist auf dem Weg in den Markt in einem guten Zustand. Das energiewissenschaftliche Gebäude steht, es muss popularisiert und politisiert werden. Die Technische-Gase-Industrie ist lieferfähig und betriebsbereit, die Ölindustrie ist kundig, der Elektrizitätswirtschaft würde Einsicht in das zweite Sekundärenergienetz, das Wasserstoffnetz, gut tun, dem Schiffbau steht das erste LH2-Tankschiff noch bevor, die Automobilindustrie ist wohlpräpariert, ebenso sind es die Lieferanten der Hausenergiesysteme. Sowohl Wasserstoffautos als auch Hausenergiesysteme warten nur auf die Komplettierung der Wasserstoffinfrastruktur.

Der Zeitablauf, rückblickend und vorausschauend, entspricht solidem Vorgehen. Nur kein Strohfeuer, das in so manchem vorangegangenen Fall rasch wieder verlöschte, sondern Langmut und Kontinuität in der Herangehensweise. Die parallele Entwicklung zu Batterie-Elektrofahrzeugen stört nicht weiter, denn Elektrik- und Elektronikentwicklungen sowie Leichtbau kommen beiden Parallelen zugute.

Was der Wasserstoffenergiewirtschaft noch fehlt, ist der ausstehende nationale Konsens in Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Bevölkerung. Hieran ist zu arbeiten: Truly, the hydrogen energy economy is humans' common cause, it is, however, not yet in the mainstream of the energy game where it constitutionally belongs – soon!

Artikel vom 24.04.2012, 08:58